

КОМПЛЕКСНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ С ВЫКАТНЫМ ПОДОМ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ СВАРНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Г.М. Дружинин¹, А.А. Ашихмин¹, П.В. Маслов¹, А.Б. Попов¹,
Н.Б. Лошкарев², С.А. Галкин³

¹ ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической
теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»)
(г. Екатеринбург, Россия)

² ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
(г. Екатеринбург, Россия)

³ ОАО «МЗиК» (г. Екатеринбург, Россия)

Приведено описание комплексной реконструкции термической камерной печи с выкатным подом для термообработки сварных металлоконструкций. Основная система отопления печи, построенная на базе двенадцати скоростных рекуперативных горелок, дополнена системой рециркуляции дымовых газов с подогревом последних в выносной камере, что обеспечивает равномерность температурного поля в рабочем пространстве печи с точностью не более ± 10 °С.

Приведены результаты пусконаладочных работ и режимно-наладочных испытаний печи.

Ключевые слова: термическая печь, система отопления, рекуперативная горелка, режимно-наладочные испытания, равномерность нагрева.

The description of complex reconstruction of the thermal chamber furnace with rolling hearth for heat treatment of welded metalwork is provided then. The main heating system with a twelve high-speed recuperative burners is added with the system of recirculation of heating flue gases that provides uniformity of a temperature field of the furnace with accuracy no more than ± 10 °C. Results of commissioning and regime and adjustment tests of the furnace are given.

Keywords: heat-treatment furnace, heating system, recuperative burner, regime and adjustment tests, uniformity of heating.

Существующие термические камерные печи с выкатным подом в механосборочном цехе ОАО «МЗиК» предназначены для термообработки различных сварных металлоконструкций массой до 15 т в диапазоне температур от 20 до 650 °С. Размеры рабочего пространства печей: длина – 9,65 м, ширина и высота – 3,4 м. Система отопления на базе двухпроводных горелок неполного предварительного смешения, установленных на боковых стенах печи, не обеспечивает требуемую равномерность температурного поля в рабочем пространстве. На некоторых режимах термообработки перепады температур в рабочем пространстве печи составляли 60–100 °С, что приводило к потере качества сварных металлоконструкций при их термообработке и отбраковке последних. Это послужило основной причиной реконструкции и определило главную ее цель – обеспечение равномерности температур в рабочем пространстве не более ± 10 °С на всех режимах термообработки.

По проекту ОАО «ВНИИМТ» одна термическая камерная печь с выкатным подом была реконструирована в объеме, включающим металлоконструкции, футеровку, заслонку печи с механизмами подъема–опускания и уплотнения, выкатной под с механизмом уплотнения, системы газовой подачи и дымоудаления, АСУ ТП и электроснабжение.

Для создания равномерного поля температур было решено оборудовать печь системой рециркуляции дымовых газов. С помощью пакета прикладных программ выполнены расчеты газовой динамики и температурных полей в рабочем пространстве при различных схемах размещения газовых горелок и сопел ввода рециркулята на печи, а также при различных скоростях истечения рециркулята из сопел и различных объемах рециркулирующих дымовых газов. В результате была выбрана наиболее эффективная схема рециркуляции, когда дымовые газы возвращаются в печь по двум коллекторам со щелевыми отверстиями. Коллекторы размещены внутри печи вдоль боковых стен, причем один размещен под сводом печи, второй (у противоположной стены) – у основания печи. Соответственно из одного коллектора рециркулят истекает через щели вдоль боковой стены в направлении сверху вниз, из другого – снизу вверх. Результаты расчетов показывают, что имеет место достаточно равномерное распределение скоростей газов вблизи поверхности садки и температур на самой поверхности, при этом разность температур не превышает 2–3 °С. Такая схема рециркуляции была реализована при реконструкции печи.

Основной элемент системы – рециркуляционный вентилятор конструкции ОАО «ВНИИМТ» с температурой применения до 700 °С, установленный на металлоконструкциях над сводом печи (рис. 1). Через отверстие

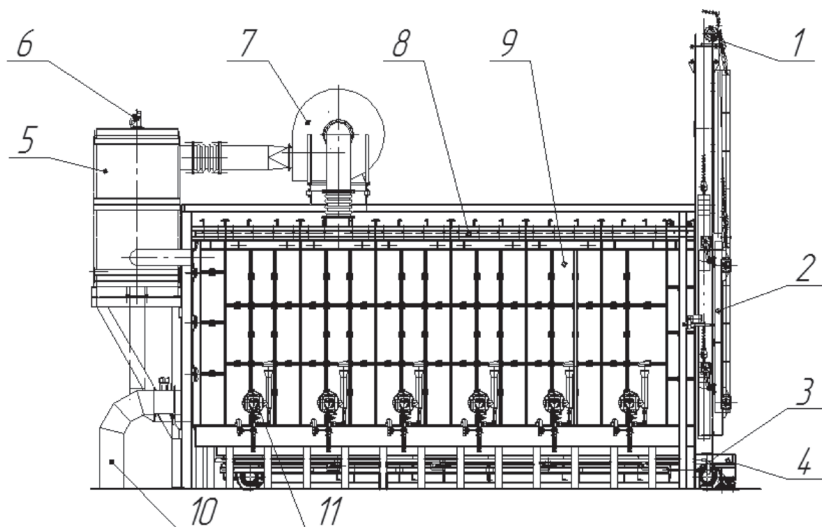


Рис. 1. Эскиз печи, боковой вид:

1 – механизм подъема заслонки; 2 – подвижные направляющие механизма прижима заслонки; 3 – привод механизма уплотнения пода; 4 – выкатной под; 5 – камера подогрева рециркулята; 6 – горелка камеры подогрева рециркулята; 7 – рециркуляционный вентилятор; 8 – сводовые панели; 9 – боковые панели; 10 – дымоотводящий канал; 11 – основные горелки

в своде печи высокотемпературный вентилятор забирает дымовые газы из рабочего пространства и направляет их в выносную камеру подогрева рециркулята, оборудованную автоматизированной горелкой ВЮ 125Н. Горелка обеспечивает плавное регулирование мощности при минимальном коэффициенте избытка воздуха, поддерживаемом с помощью регулятора соотношения «газ – воздух». После подогрева в выносной камере рециркулят возвращается в рабочее пространство печи по двум коллекторам переменного сечения со щелевыми отверстиями. При этом обеспечивается интенсивное движение продуктов сгорания вокруг садки и выравнивание температур во всем объеме рабочего пространства печи. Расход рециркулирующих продуктов сгорания регулируется изменением оборотов двигателя рециркуляционного вентилятора с помощью частотного преобразователя. При достижении заданной температуры в печи, горелка камеры подогрева рециркулята переводится в режим минимального горения и включается основная система отопления печи, построенная на базе двенадцати автоматизированных скоростных рекуперативных горелок REKUMAT M250 номинальной тепловой мощностью 160 кВт каждая.

Горелки размещены на боковых стенах печи, на правой стене – над садкой (6 шт.) на левой – ниже садки (6 шт.). Такое расположение горелок при высокой скорости истечения продуктов сгорания из горелок (~150 м/с) позволяет создать вместе с системой рециркуляции циркуляционные контуры движения газовых потоков, обеспечивающие выравнивание температуры в рабочем пространстве печи и равномерный нагрев садки. Встроенные в горелки рекуперативные теплообменники позволяют возратить в печь примерно 50 % тепла уходящих дымовых газов, тем самым существенно сокращая потребление топлива при термообработке.

Конструктивно печь состоит из основания печи, боковых стен, свода, заслонки окна погрузки и выкатного пода.

Боковые стены и свод печи выполнены сборными из футерованных уплотненным керамическим волокном МКРВ-200 панелей, имеющих металлический каркас. Основанием печи является металлокаркас, футерованный огнеупорным кирпичом. Заслонка также футерована МКРВ-200 и оборудована для ее подъема–опускания мотор-редуктором со встроенным электромагнитным тормозом и прижимными устройствами для обеспечения герметичности рабочего окна. Ход подъема заслонки – 3300 мм, время подъема – 18,3 с.

Выкатной под выполнен в виде самоходной тележки с размещенным на ней мотор-редуктором. Уплотнение пода с основанием печи осуществляется с помощью подвижной рамы, приводимой в действие двумя электрическими прямоходными механизмами, установленными под основанием печи с двух сторон от выкатного пода. Выкатной под выложен огнеупорным кирпичом в виде ячеек, заполненных керамзитом для уменьшения массы, сверху на керамзите также выложен слой огнеупорного кирпича. На кирпичном основании выкатного пода размещаются жаропрочные литые лежки (всего 7 шт.), на которых, собственно, и устанавливают садку (сварные металлоконструкции) для термообработки.

Система газоснабжения выполнена в соответствии с требованиями федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила

безопасности сетей газораспределения и газопотребления». На трубопроводах природного газа установлены измеритель расхода газа СГ16МТ-250-40-С, необходимая запорно-регулирующая арматура, датчики системы автоматизации.

Воздухоснабжение горелочных устройств организовано с помощью вентиляторов ВР 140-15-8ПР (рабочий и резервный, установлены в непосредственной близости от печи). Подача воздуха на горение осуществляется открытием воздушных клапанов от сигналов блоков управления горелками. Давление в подводящем воздухопроводе – постоянное, оно поддерживается изменением оборотов двигателей дутьевых вентиляторов с помощью частотных преобразователей.

Отвод дымовых газов от печи осуществляется дымососом ДН-12, установленным вблизи дымовой трубы. Система дымоудаления состоит из двух частей. Основное количество дымовых газов (~80 %) отбирается эжекторами горелочных устройств REKUMAT M250 от встроенных рекуператоров и отводится по коллекторам в существующий боров печей, откуда с помощью дымососа дымовые газы сбрасываются в дымовую трубу. Оставшиеся 20 % продуктов сгорания отводятся непосредственно из печи через дымоотвод, на котором установлен круглый шибер с электроприводом МЭО для регулирования давления в рабочем пространстве печи. Этот дымопровод также введен в боров печей. Дымопроводы теплоизолированы теплоизоляционным иглопробивным одеялом из керамического волокна ТИО-128 и покрыты алюминиевой фольгой ДПРХТ. На дымопроводах и воздухопроводах также установлены датчики системы автоматизации.

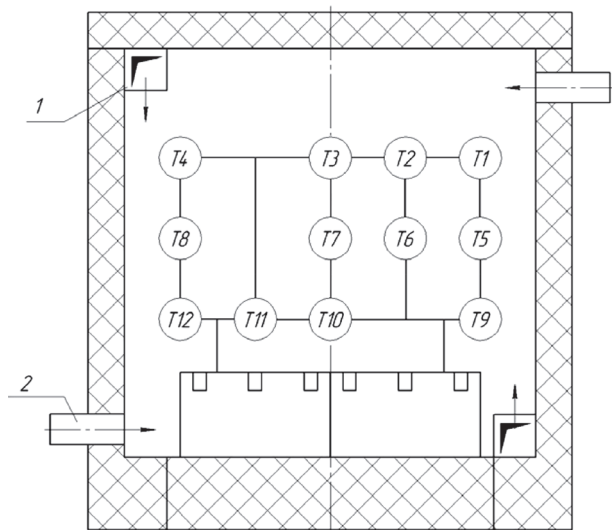
АСУ ТП выполнена на базе универсального контроллера SIMATIC S7-300 с модульными станциями удаленного ввода/вывода – SCADA системы SIMATIC Win CC. В помещении операторской установлено автоматизированное рабочее место оператора печи. АСУ ТП обеспечивает управление печью по фиксированным, разработанным технологами предприятия программам термообработки, выбор программы осуществляется оператором. Вся информация о работе печи, состоянии систем, оборудования, уставки и коэффициенты ПИД-регуляторов выводится на экран монитора. Информация отображается на экране в виде мнемосхем, на которых отслеживается текущее состояние всех механизмов печи, текущие технологические параметры и изменение их во времени. Система позволяет управлять работой любого механизма в автоматическом и ручном режимах. Все основные параметры в виде графиков нагрева, численных значений с привязкой по времени сохраняют в архиве не менее трех месяцев.

Система автоматики производит отключение подачи газа к горелкам и формирование предупредительной и аварийной световой и звуковой сигнализации в случаях загазованности помещения и отклонения технологических параметров сверх допустимых значений.

После реконструкции нагревательной печи были выполнены пусконаладочные работы по программе, изложенной в [1]. Дополнительно проведена проверка скорости истечения рециркулята через раздающие щели по длине коллекторов. Для этого при различных оборотах двигателя рециркуляционного вентилятора с помощью пневмометрической трубки определялся динамический напор истекающего потока рециркулята во всех 12 щелях по длине

В данной печи, где могут нагреваться металлоконструкции различной формы и массы, равномерный нагрев изделий может быть достигнут за счет равномерного распределения температуры греющих газов во всем объеме рабочего пространства и длительной выдержки металла при конечной и постоянной температуре поверхности. То есть при равномерном распределении температуры газов в рабочем пространстве печи обеспечивается равномерный нагрев изделий любой формы, а равномерность окончательного распределения температур по всей массе металла определяется длительностью выдержки.

На передвижной раме были закреплены 12 гибких термоэлектрических преобразователей ТХК, что позволяло определять температуры в двенадцати точках любого поперечного сечения печи. Схема установки термопреобразователей представлена на рис. 2. Термопреобразователи подключались



1 – раздающий коллектор системы рециркуляции; 2 – горелка

к четырем цифровым регистраторам температуры CENTER-309, которые размещались в термосе с двойной тепловой изоляцией и водяной рубашкой. Термос крепился к основанию рамы и находился в печи во время проведения эксперимента, что обеспечивало автоматическую регистрацию (1 раз в 30 с.) температуры во всех 12 точках. Дополнительно в термосе был размещен термопреобразователь № 13, который фиксировал температуру внутри термоса во время проведения экспериментов.

Таким образом, испытания были проведены в трех режимах работы печи при температурах 200, 450 и 650 °С. На рис. 3 представлены результаты испытаний для температурного режима 450 °С. Фоном на рисунке выделены промежутки времени нахождения передвижной рамы в характерных сечениях рабочего пространства печи C1, C2, C2a и т.д. в соответствии с приведенной схемой. Небольшое превышение средней по сечению температуры, зафиксированное термопреобразователем № 4, объясняется нахождением данного термопреобразователя вблизи выхода струй газов из коллектора системы рециркуляции (см. рис. 2). Это превышение носит незначительный характер, при рабочих режимах в этой зоне садка не размещается. Ввиду ограничения длительности эксперимента (зависит от времени работы аккумуляторов регистраторов температуры) выдержка печи при заданной температуре перед началом передвижения рамы давалась минимальная. Этим можно объяснить повышение равномерности температурного поля в конце измерений.

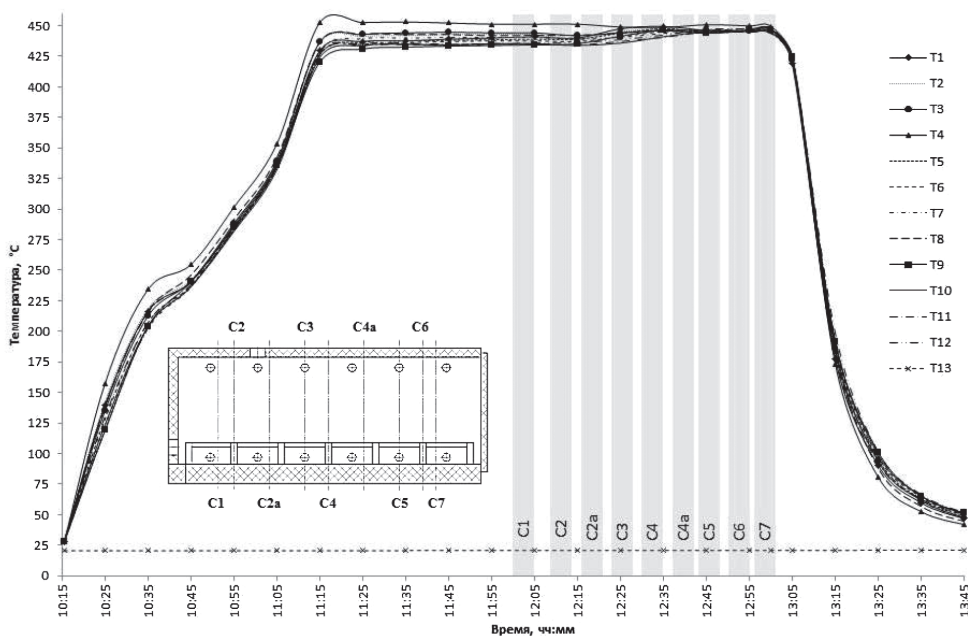


Рис. 3. Опыт с передвижной рамой, температура в печи 450 °С

По результатам экспериментов установлено, что неравномерность температурного поля рабочего пространства печи в различных режимах работы печи составляет $\pm 7^\circ\text{C}$. Также в экспериментах при максимальной температуре испытаний 650°C фиксировались показания двенадцати стационарных термопреобразователей, установленных на боковых стенах печи. При нахождении рамы с термопреобразователями в контрольных сечениях С1, С4 и С7 отклонение показаний отдельных термопар от средней температуры рабочего пространства составляет не более $\pm 6^\circ\text{C}$. Таким образом, температурное поле в печи следует считать равномерным.

Режимная наладка нагрева металла в печи выполнена в целях обеспечения рациональных температурно-тепловых режимов с учетом всех составляющих теплового баланса печи.

При выполнении режимно-наладочных испытаний проводился непрерывный контроль давления природного газа в коллекторе перед горелками, давления воздуха перед горелками, давления в печи, разрежения в дымовом тракте, температуры в рабочем пространстве во всех двенадцати зонах отопления печи, температуры рециркулята, проводились измерения расхода природного газа, выполнялись отборы и анализ отходящих дымовых газов.

Термообработка сварных конструкций проводилась в режимах, показанных в табл. 1.

Таблица 1

Режимы термообработки сварных металлоконструкций

Режим	Специзделие № 1 на стапеле	Специзделие № 2
Темп нагрева	До 300°C : 300°C/ч От 300 до 640°C : 120°C/ч	До 450°C : 225°C/ч
Выдержка	При температуре 640°C 2 ч	При температуре 450°C 3 ч
Охлаждение	Вместе с печью до 300°C	На воздухе

Испытания были проведены как в режиме дистанционного ручного управления (термообработка специзделия № 1 на стапеле), так и в полностью автоматическом режиме с предварительным заданием графика нагрева (термообработка специзделия № 2). Соответствующие термограммы процесса нагрева (по измерениям стационарных термопреобразователей в двенадцати зонах отопления) представлены на рис. 4. В обоих случаях отклонения температуры в рабочем пространстве печи не превышали $\pm 5^\circ\text{C}$.

Дополнительно на сварных конструкциях, подвергнутых термообработке, размещались 12 термопреобразователей типа ТХА для контроля равномерности нагрева изделий. Термограммы нагрева, полученные с помощью дополнительных термопреобразователей, и схемы их размещения, представлены на рис. 5. Отставание показаний термопар Т2, Т4 в процессе нагрева специзделия № 1 (рис. 5, 1) связано с тем, что эти термопары были размещены наиболее близко к массивному стапелю (сток тепла). Аналогично при нагреве специзделия № 2 (рис. 5, 2) наблюдался замедленный подъем температуры в зонах вблизи массивных лежек (Т6, Т8). К концу периода выдержки максимальный перепад температуры на поверхности изделия не

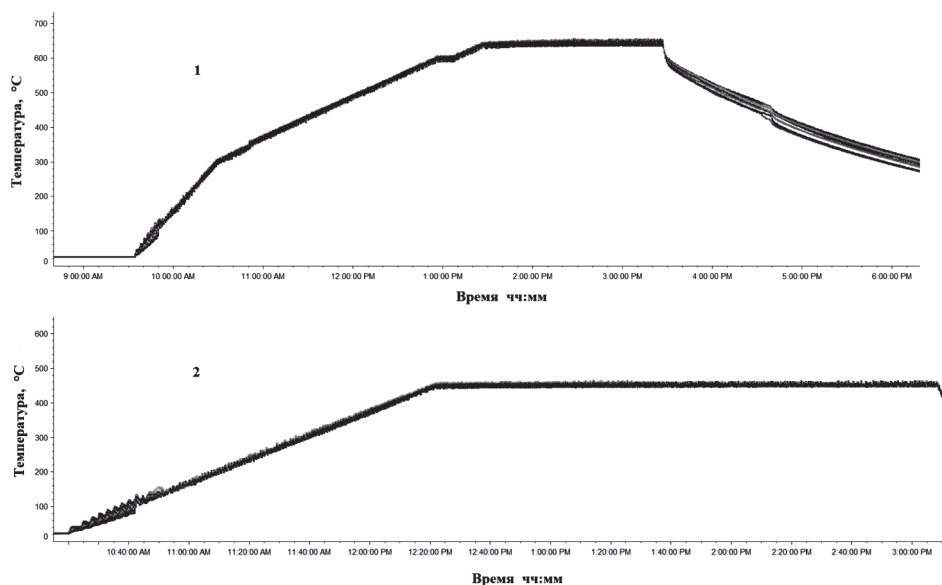


Рис. 4. Термограмма процесса термообработки специзделий:
1 – специзделие № 1; 2 – специзделие № 2

превышал 16°C (рис. 5, 1, $T_3 - 638,5^{\circ}\text{C}$, $T_7 - 622,9^{\circ}\text{C}$), имея тенденцию к дальнейшему снижению. Вероятно, следует признать, что время выдержки, предложенное технологами предприятия, является достаточным для выравнивания температуры по садке до приемлемого уровня.

При выполнении испытаний печи с заданными режимами термообработки специзделий был выполнен сбор всех данных по работе печи, необходимых для расчета теплового баланса [1]. Типичный газовый анализ (с небольшими отклонениями) при работе печи следующий: $\text{CO}_2 = 10,85$ об.%, $\text{O}_2 = 1,60$ об.%, $\text{CO} = 0,007$ об.%. Максимальное количество NO_x , зафиксированное в составе дымовых газов печи, составило 184 мг/м^3 , что соответствует заявленным показателям работы горелок.

Дополнительно с помощью пирометра были выполнены замеры температуры наружной поверхности печи для расчета потерь тепла от наружного охлаждения. При температуре в печи в режиме выдержки, равной 640°C , температура поверхности на заслонке была в диапазоне $25\text{--}38^{\circ}\text{C}$, на своде печи – $39\text{--}55^{\circ}\text{C}$.

Данные режимно-наладочных испытаний работы термической печи обобщены и представлены в режимных картах, переданных на предприятие.

Установленные горелочные устройства обеспечивают полное сжигание топлива в пределах рабочего пространства печи. Содержание CO и NO_x ниже допустимой нормы по ГОСТ 21204–97 и ГОСТ Р 50593–97 соответственно.

Основные затраты теплоты в цикле термообработки показаны в табл. 2.

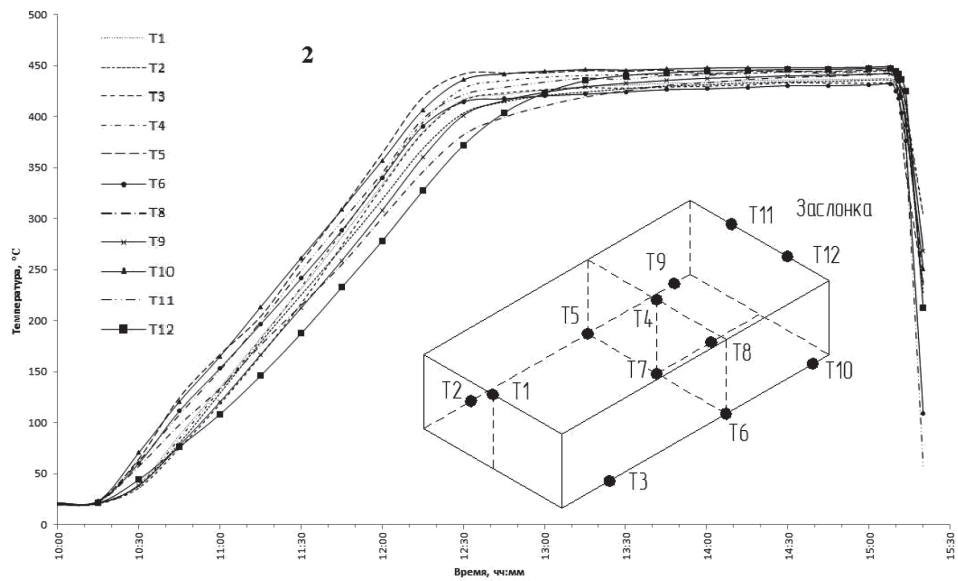
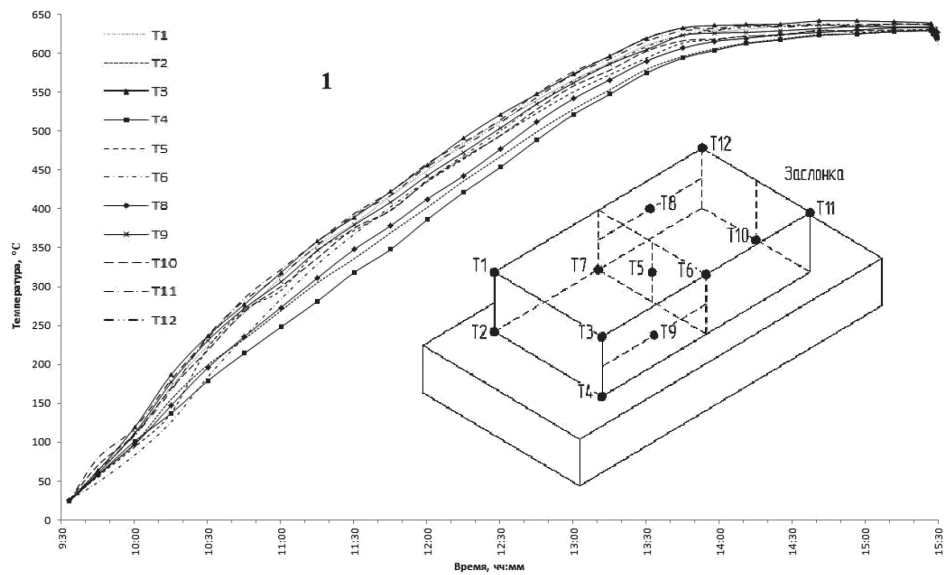


Рис. 5. Термограмма нагрева специзделий:
1 – специзделие № 1; 2 – специзделие № 2

Т а б л и ц а 2

Основные затраты теплоты в цикле термообработки

Показатель	Ед. изм	Специзделие № 1	Специзделие № 2
Общий расход теплоты за цикл, в т. ч.	МДж	20222	10680
нагрев металла садки	%	10,9	8,5
нагрев лежек	%	23,8	22,6
нагрев футеровки, пода печи	%	35,1	40,7
с уходящими дымовыми газами	%	21,5	20,1
теплопроводностью через стены	%	8,7	8,1
Удельный расход условного топлива	кг у.т./т	28,65	146,2

Выводы

Выполнена комплексная работа по реконструкции термической камерной печи № 2 механосборочного цеха № 25 ОАО «МЗиК», начиная от предварительных расчетов, результаты которых нашли свое воплощение при разработке проекта, до строительства всего комплекса и выполнения пусконаладочных работ и режимно-наладочных испытаний. Основная цель реконструкции по обеспечению равномерности температур в рабочем пространстве печи не более ± 10 °С на всех режимах термообработки достигнута. Предприятию передан новый агрегат, укомплектованный современным оборудованием, включая рекуперативные горелочные устройства и АСУ ТП, позволяющую вести термообработку сварных металлоконструкций в полностью автоматическом режиме управления.

Список использованных источников

1. СТО НОСТРОЙ 2.31.12–2011. Стандарт организации. Промышленные печи и тепловые агрегаты. Проведение и контроль выполнения пусконаладочных работ [Текст]. – М.: ООО Изд-во «БСТ», 2011. – 41 с.